

神経筋・エネルギー発生機構を意識した幼児の基礎的運動能力に関する研究

鈴木 洋 平* 浅 野 正 博**

大 木 み わ*** 吉 澤 茂 弘***

A Study on Motor Performance of Young Children with Special Reference to Coordination and Energy

はじめに

身体運動 (body movement) は、骨格というテコに付着している骨格筋の収縮・弛緩によって起るが、それは、目的・課題にそった運動を展開するために、感覚・神経系機能により、どの骨格筋 (spacing) を、いつ (timing)、どのくらいの力・スピード (grading) で動員するかということ、感覚・神経系機能により、瞬時に決定しなければならない。そして、このことを神経筋調整作用 (neuromuscular coordination) と呼んでおり、ときには自動制御 (cybernetics) とも言われている。

一方、骨格筋の収縮・弛緩に不可欠なエネルギーは、骨格筋自体で発生するが、その直接的エネルギー源でありまた高エネルギー分子であるATPのADPとPiへの分解によって生ずるものである。ところが、ATPの骨格筋含有量は極めて小さく、従って運動を持続するためには、間接的エネルギー源であるCrP、glucose及びfatty acid等の生化学的無酸素性ないし有酸素性過程において生ずるエネルギーを絶えず仰がなければならない。そして、最終的には酸素が不可欠であり、その酸素を大気中から取り込む役割を演じているのが呼吸循環機能ないし酸素運搬系 (circulorespiratory function or oxygen transporting system) であり、そこにミトコンドリアの生化学的酸化能力が加われば、包括的な有酸素性能力 (aerobic capacity) となる。

そこで、本研究においては、骨格筋の筋力が筋繊維に到達する単位時間のインパルスの数に比例し、かつ動員される運動単位 (neuromuscular motor unit, NMU) の種類とその数の大きさによって規定されるというTOKIZANEら⁶⁾の報告に着目し、相性運動単位 (kinetic or phasic NMU, K-NMU) を主役とし、また無酸素性のATP-CrP系による立ち幅跳び・25メートル走を、またそれに対応するものとして持続性運動単位 (durable or tonic NMU, T-NMU) と、有酸素性の解糖・脂肪酸 β 酸化作用・Krebs回路系による持久走を選び、これら両者の能力とその発達の相互関係を幼児を対象としてその実体を把握しようとしたものである。

* 植草学園短期大学専攻科児童障害福祉専攻

** 玉造幼稚園副園長

*** 植草学園短期大学

*** 植草学園短期大学

研究方法

1 被験者

成田市玉造幼稚園年長組男児63名、女児49合計112名であった。

2 測定期日及び場所

平成13年7月4日（木）及び平成14年2月21日（木）の両日、当園園庭・隣接公園及び市道で行われた。

3 測定項目

1) 体格

日内変動を考慮し、午前10～11時において計測したが、身長については眼耳水平に留意しmm単位まで、体重については0.1kg単位まで読みとった。

2) 身体組成 (body composition)

体脂肪量の目安として、栄研式皮脂厚計により、正面右側の上腕背部 (upper arm back)、肩甲骨下角部 (subscapular angle)、腸骨稜部 (iliac crest) 及び臍部 (juxta-navel) の4ヶ所を計測した。なお、特に正確を期して、皮膚接面積10mm²当たり10gの圧力が加わるように校正し、皮膚割線に沿って計測した。

3) 運動能力

a 25メートル走

園に隣接する公園に、幅1メートル、長さ30メートルのセバレートコースを2コース並列させ、スタートラインから25メートルの位置に幼児走者には気付かれないように薄いラインを設けた。スタートの合図は旗の振り下ろしと、口頭による合図で2名同時にスタートさせたが、この年齢では反応時間に個人差が大きいので、25メートルラインに位置する計時者は、走者の第一歩の動きを見てストップウォッチを作動させるようにした。走者は30メートルラインまで、予めそこに位置している担任の保育士の先生の励ましのジェスチャーと掛け声のもとに全力で走るようにした。計時者は、25メートル通過時にストップウォッチを止めた。

b 立ち幅跳び

砂場桧木の角を第1・2中足骨遠位部で蹴って出来るだけ遠くまで跳ぶようにした。砂場の面は砂場桧木の上面と同位にした。この種目は、練習効果が直ぐに現れ安いので、被験者園児グループ全員の前で、験者が師範し、一度練習させてから跳躍測定に移った。

両種目ともに、2回の試技のうち良い方の記録を個人の成績とした。

c 持久走

当園において12月に行われている恒例のいわゆるマラソン大会における860メートル持久走所要時間を記録した。それは、ゴールラインの延長上に大型デジタル時計を置き、反対側から被験者のゴールインを連続的にビデオ撮影し、その後あらためて所要時間を確認した。

4) 統計処理

まず、全ての測定変量について性別に平均値・標準偏差はもとより、相関行列 (correlation matrix) を作成した。そのなかで、まず、25メートル走と立ち幅跳びについては、相関係数による再現性 (reproducibility) と妥当性 (validity) を検討し、次いで、因果関係が存在すると思われる変量間の一次回帰式 (linear regression equation) を算出し、その傾向を確認した。また、他の研究報告に示されたデータとの、群間の t 検定による、比較も試みた。

結果及び考察

表1、表2は、本研究において扱われた測定項目すなわち変量の基本的統計値である。測定日における年齢を日単位でみると、男児2091日、女児2112日であり、その差僅か3日であった。また、標準偏差も男女児それぞれ14.1日、15.9日であり、従って、他の変量に関して比較検討するうえで問題は無いということが確認された。

まず、身長についてみると、男児の110.9cm、女児の111.5cmの間に有意の性差は見られなかった。また、体重においては男児の19.26kgが女児の18.12kgを群間のt検定によれば $p < 0.05$ で有意に上回っていた。また、全国平均値⁹⁾における5歳男女児の身長110.7cm、109.9cm、また体重19.2kg、18.8kgとの間に有意差は認められなかった。従って、身長・体重から見ると偏りのない標準的な子どもが測定の対象になったものといえる。また、栃木県幼稚園教育研究所¹¹⁾による年長組男児305名、女児311名を対象とした値と比較すると、身長における男女児の113.3cm、112.9cm、体重における20.31kg、20.19kgのうち、本研究の女児体重のみが $p < 0.05$ で有意に低い値であった。

表1 男児年長組基本的統計 (n = 63)

身長 (cm)	体重 (kg)	皮脂厚 (mm) †				25メートル走 (秒)		立ち幅跳び (cm)		860メートル走 (秒)
		(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(1)	(2)	
110.97 (0.64)	19.26 (0.40)	10.97 (0.41)	5.78 (0.36)	6.38 (0.61)	6.92 (0.66)	6.16 (0.06)	6.26 (0.10)	96.5 (2.4)	98.1 (2.1)	368.4 (7.7)

† 皮脂厚：(1)上腕背部、(2)肩甲骨下角部、(3)腸骨腰部、(4)臍部
平均値 (標準偏差)

表2 女児年長組基本的統計 (n = 49)

身長 (cm)	体重 (kg)	皮脂厚 (mm)				25メートル走 (秒)		立ち幅跳び (cm)		860メートル走 (秒)
		(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(1)	(2)	
111.58 (0.78)	18.82 (0.43)	12.13 (0.49)	6.50 (0.56)	7.15 (0.69)	8.13 (0.69)	6.77 (0.23)	6.44 (0.10)	90.9 (2.2)	91.7 (2.1)	344.2 (7.4)

† 皮脂厚：(1)上腕背部、(2)肩甲骨下角部、(3)腸骨腰部、(4)臍部
平均値 (標準偏差)

また、身体組成 (body composition) の立場から、皮脂厚についてみると、肩甲骨下角部において有意の性差は認められなかったが、他の上腕背部、腸骨陵部、臍部の3ヶ所においては、女兒が男児を $p<0.05$ で有意に厚く、従って既に幼児においても男児が女兒よりも低い体脂肪率(%fat)であるという傾向が認められた。体重に性差が認められなかったことを勘案すると除脂肪体重 (lean body weight, LBW) において男児が大きく、このことは骨格筋量において男児が女兒よりも大きいことを示しており、従って、男児にとっては運動能力のスピード・パワーにおいて女兒より有利であることを意味している。

運動能力に関しては、先ず再現性について眺めてみると、25メートル走の1回目と2回目の平均値は、男児ではそれぞれ6.16秒、6.26秒、女兒ではそれぞれ6.77秒、6.44秒となっており、そして、1回目と2回目の間には、男児では $R^2=0.1943$ ($r=0.4407$)、女兒では $R^2=0.1567$ ($r=0.3958$)となり、男女児ともに $p<0.05$ で有意性は見られたものの低い相関はであった。こうしてみると、25メートル走の再現性は明らかに低いということが分かった。一方、立ち幅跳びにおいては、1回目と2回目の平均値は、男児ではそれぞれ96.5cm、98.1cm、女兒ではそれぞれ90.9cm、91.7cmとなっており、1回目と2回目の間には、図1および図2に見られるように、男児では $R^2=0.7385$ ($r=0.8593$)、女兒では $R^2=0.7957$ ($r=0.8920$)となり、25メートル走とは打って変わって、 $p<0.001$ とう有意の、しかも高い相関が認めれた。従って立ち幅跳びの再現性は極めて高いということが明らかにされた。

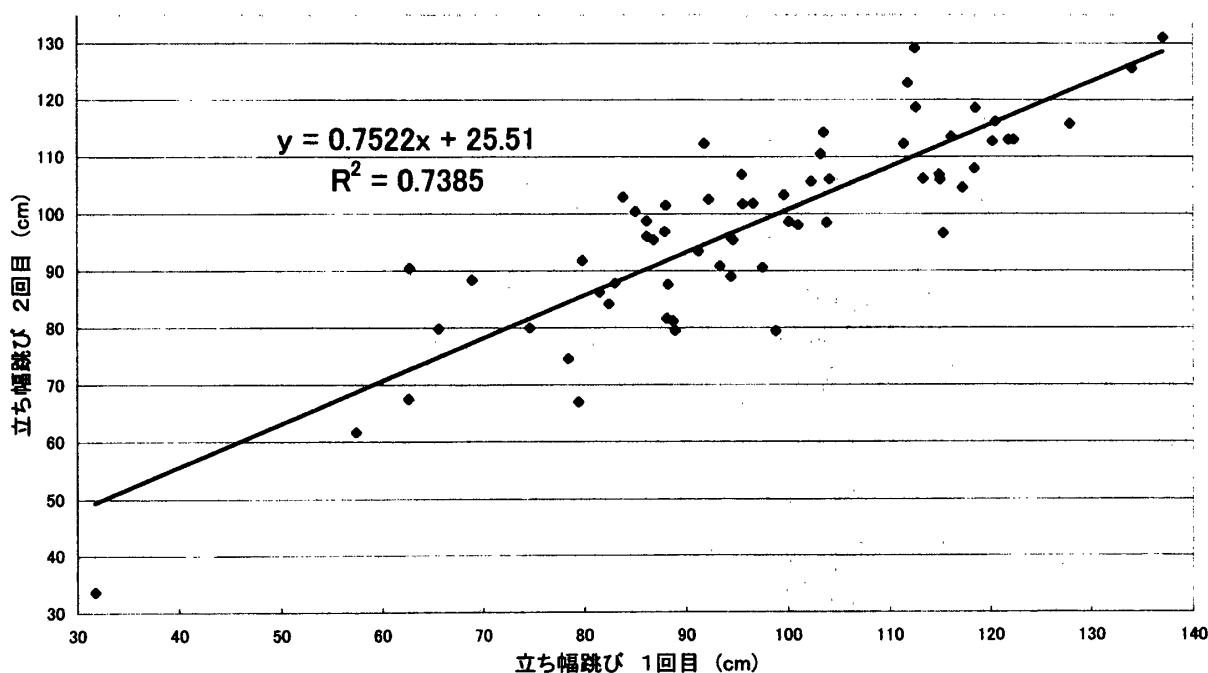


図1. 男児の立ち幅跳びの再現性(1回目と2回目の相関)

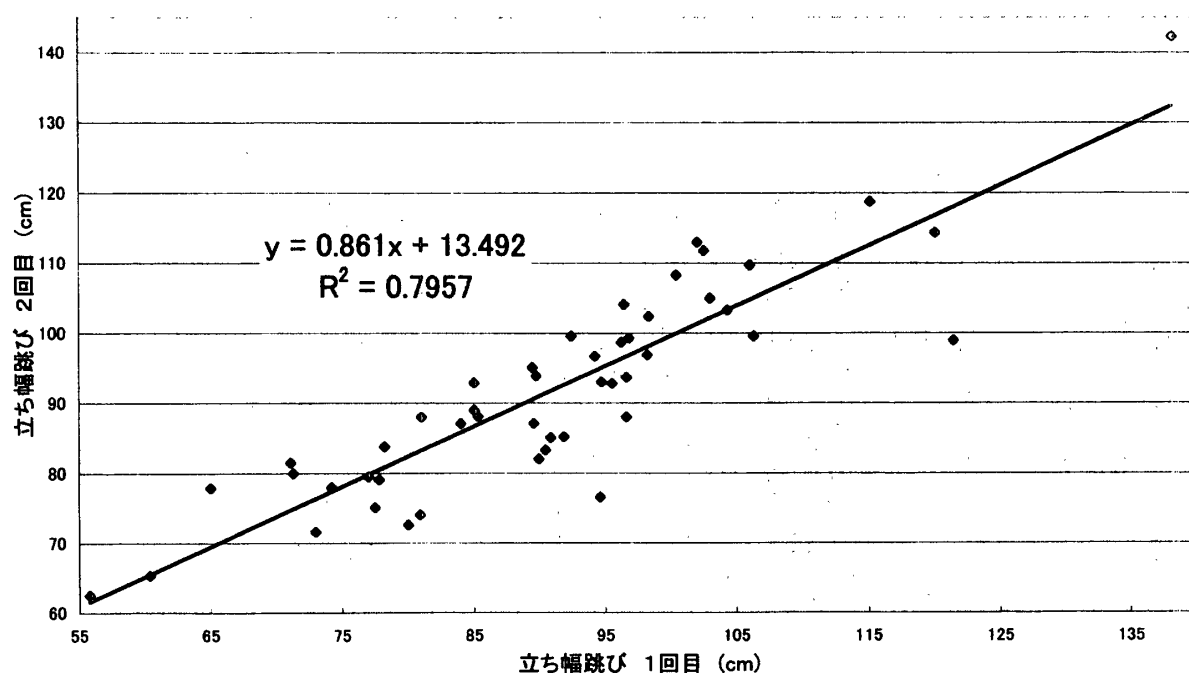


図2. 女児の立ち幅跳びの再現性(1回目と2回目の相関)

こうしてみると、立ち幅跳びという動作は、あまり技術を必要としないが単発的な最大限の筋パワーによって発動されるのものだけに、その背景には、大脳の運動中枢から骨格筋線維へ送られる単位時間のインパルスの数も最大に近いものであり、しかも再現性が高いことから、幼児の場合でも、個人の筋パワーの大きさの測定に適したものであることが分かる。同時に、瞬時ではあるが、このように、あまり変動することなく一定の、しかも最大限に活動するという生理学的意味が存在するから、骨格筋そのものの発達ばかりでなく、それを最大限に動員できるようにするという神経機構の改善につながる動作として有効なものである。保育園・幼稚園等で、遊びが広く取り入れられているが、そのなかに、こうした姿の動作を、指導者側は意識して組み込むことが必要である。換言すれば、思いきり力を出し切る場面をどのように設定するかという問題でもある。

他方、25メートル走では、所要時間が6～7秒にも達しており、しかも、立ち幅跳びの動作が上肢と下肢においてともに左右、同期性、同側性の相反性神経支配によって展開されるのに対して、左右、交叉性の相反性の神経支配の要素が大きく関与するので、日頃走行動作が欠けている場合には大きく変動するものである。従って、25メートル走においては、反復練習により、こうした特有の神経機構の発達経緯を、平均値ばかりではなく再現性を確認しながら、追跡することが大きな課題となってくる。そして、常にに自己の力が発揮できるようにすることが肝心である。

エネルギーの面からみると、立ち幅跳びは、ATP-CrP系（別名ホスハーゲン系, phosphagen system）のうちのATPのみの分解によるものであり、25メートル走はATPの分解に加えてCrPの分解がが上乗せされるので、同じ非乳酸性の無酸素性過程ではあるが、大きな差異が存在することを認識しながら対応しなければならない。

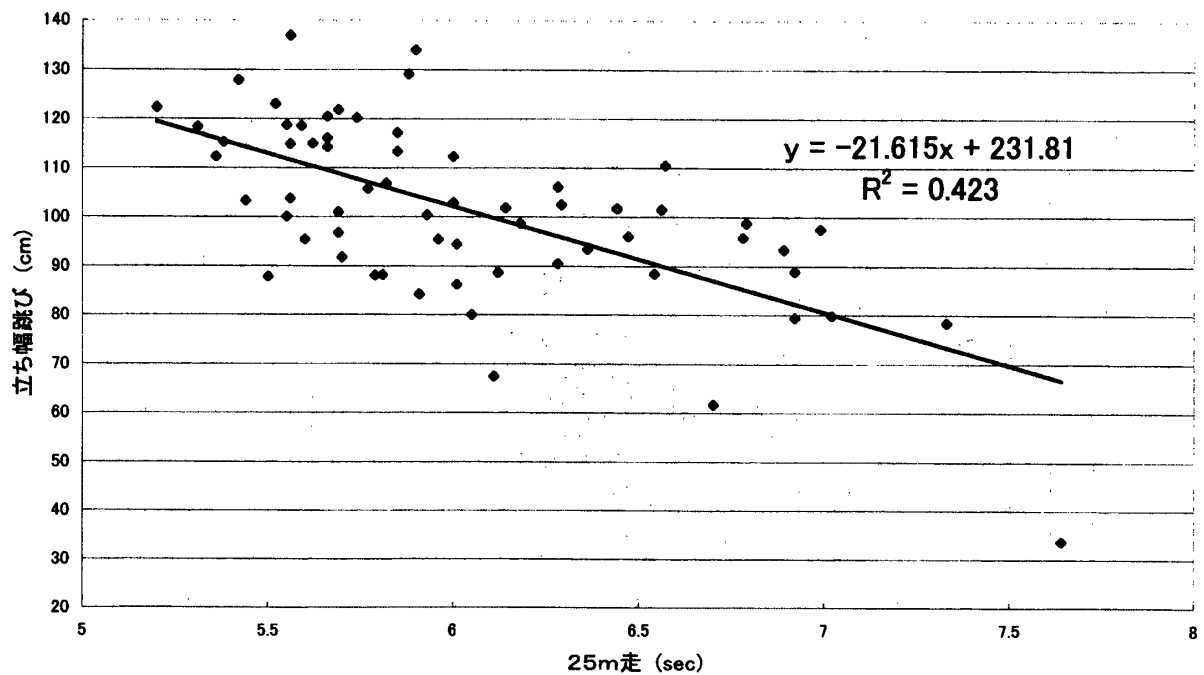


図3. 男児の25m走と立ち幅跳びの相関

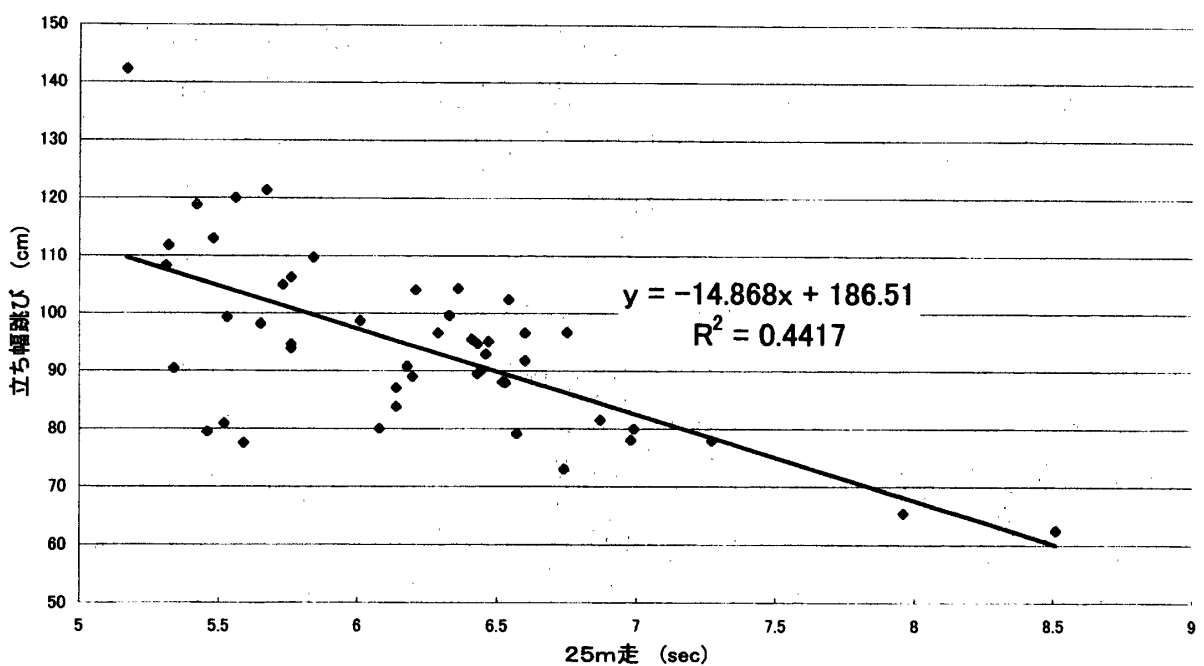


図4. 女児の25m走と立ち幅跳びの相関

次に、こうした25メートル走と立ち幅跳びの間にどのような関係があるのかを、1回目と2回目の計測において良い方の記録を個人の成績として、相関 (correlation) によって眺めたところ、男児では図3に示されているように、 $R^2=0.4230$ ($r=0.650$)、女児では図4に見られるように、 $R^2=0.4417$ ($r=0.6643$) となっており、共にほぼ同じ値でしかも $p<0.01$ で有意の相関が認められた。また、25メートルに対する立ち幅跳びの回帰直線の式を求めてみると、

男児 $y = -21.615x + 231.81$ ($n=63$, $R^2=0.4230$)

女児 $y = -14.868x + 186.51$ ($n=49$, $R^2=0.4417$)

となった。平均値においては男児が女児を上回っているということは、既に述べたが、勾配においても男児が女児の1.5倍になっており、従って、神経支配能力や、骨格筋の非乳酸性の無酸素性パワーの相互の調和的発達の度合は、幼児期から既に男児が女児を凌いでいることが窺われる。

これまで、立ち幅跳びと25メートル走とを対比させてきたが、この両者は、前述したように、エネルギーの面からは、短時間において最大の無酸素性パワーを発揮するという立場から眺めたものである。

そこで、次の段階として、更に走行持続時間を大きくし、有酸素性パワーすなわち有酸素性解糖作用、脂肪酸の β 酸化作用、TCA回路および呼吸鎖を背景とする持久走を取り上げた。また、その成績は、Buskirkら¹⁾が指摘しているように、体重当たり最大酸素摂取能力や、またConleyら²⁾ Daniel³⁾が報告した走行効率の良し悪しによって左右されることに着目した。

とりわけ、酸素摂取能力は、次のようなFick⁵⁾の原理の式の変形から、

1 分間酸素摂取量 = 1 分間心拍手量 \times 動静脈酸素校較差

心臓容積 (heart volume, HV)、毛細血管の発達 (cappillarization) およびミトコンドリアの生化学的能力によって規定されることが知られている。こうした意味からも、非乳酸性の無酸素性パワー即ちホスハーゲン系に依存する25メートル走を対比させ、これら相反するエネルギー機構が幼児においてどのような関わり合いをもっているかを検討した。そして、25メートル走では個人の良い方の成績を、持久走は園内マラソン大会と称して860メートル走の持久走の成績を対応させた。

そこで、先ず男女児の持久走所要時間をみると、男児では368.5秒 (=139.8m/分)、女児では344.2秒 (=154.2m/分) であり、女児が男児よりも速いという結果が得られたが、これは男児が女児よりも速いというこれまでの他の報告とは相反するものであった。そして、吉澤ら^{1,2)}による5分間走における5歳男児の861m (=172m/分)、同じく女児の763m (=152m/分)、6歳男児の934m (=186m/分)、同じく女児の824m (=164.8m/分)と比較すると、特に男児においては5歳・6歳ともに $p < 0.001$ で有意差が認められた。こうしてみると、本研究における男児は遅い傾向にあることが分かった。また、女児においては、5歳においては差は見られなかったが、6歳では $p < 0.05$ で僅かに遅くなっている。このように、25メートル走では男児が女児を上回っていたにもかかわらず、持久走において男児が遅くなっているのは、日常生活において有酸素性の身体運動が、その活動水準のみならず活動量において、少なかったためと思われる。

そして、25メートル走と860メートル持久走の相関を男女児について図示したものであるが、男児では $R^2=0.1317$ ($r=0.3629$) となり、 $p < 0.05$ で低いながら有意の相関が見られた。一方、女児では $R^2=0.5085$ ($r=0.7130$) となり、 $p < 0.001$ で有意の相関が認められた。このように、男児で女児よりもかなり低い相関が見られたのは、別途作成した相関図から、25メートル走の比較

的速い男児が860メートル走持久走において劣っていたためである。そして、このことは、これら男児ではもともと有酸素性の持久性運動に関与する筋線維（T-NMU）の相対的構成比率が低いいためなのか、或いはその比率は普通であってもそれら筋線維に対する大脳運動中枢からの単位時間のインパルスの投射数が少なかったためなのかという問題を提起している。これは、既に指摘したように、他の測定値との比較から、やはり日頃の持久性運動に関わる活動が少なく、そのために、T-NMUに対する神経筋機構の十分に動員がされなかったためと思われる。ちなみに、25メートル走（秒）に対する860メートル持久走（秒）の回帰直線の式を示すと、

$$\text{男児 } y=29.218x+187.86 \text{ (n=63, } r=0.3629, p<0.05)$$

$$\text{女児 } y=47.314x+44.273 \text{ (n=49, } r=0.7130, p<0.001)$$

となっている。

一方、女児においては、 $r=0.7133$ というように高い相関が認められており、そして、これは吉澤ら¹³⁾の25メートル走と5分間走との間において見られた $r=0.380$ よりもかなり高いものであった。従って、女児の場合はK-NMUとT-NMUの相互に調和的な発達が見られたが、男児はもとより、更に絶対値を高めるような方向付けが一層望まれる。このことは、本研究における被検者のみならず、金崎ら⁸⁾、Yoshizawaら¹⁰⁾、吉澤ら^{13,14,4,15)}による保育園幼児の身体活動水準が全般的に低いという報告を考慮すれば、共通の問題でもある。こうした有酸素性能力の持久性運動の必要性の根拠をいくつか挙げてみると、先ず、吉澤ら^{10,12,15)}によれば、体重当たり最大酸素摂取量は4歳において男女児ともに成人の値に匹敵しており、持続時間さえ短くすれば持久走は可能であり、また、トレーニング能（trainability）が存在しているということを指摘することができる。更に、Eriksson⁴⁾が見出したように、やがて思春期に入り、解糖系の律速酵素ホスホフルクトキナーゼ（phosphofructokinase, PFK）の増加にともなう無酸素性能力の発達と、その無酸素性負荷によって産生される乳酸の処理能力としての有酸素性能力を高めておくためでもある。また、Lehmannら⁷⁾は、幼児では、全体重に占める骨格筋量は、健康な普通成人男子の40～50%に対して僅か25～30%に過ぎず、しかも、そのためもあって全身性の持続性運動負荷においてさえも内臓への血流量は低下せず、従って骨格筋において産生された乳酸を肝臓においてグリコーゲンに戻すことができるとしている。吉澤らも¹⁵⁾実験的に運動負荷による血中乳酸濃度の動態を検索し、それは成人のように高まらず、従って運動負荷後の回復が早いことを確証している。

こうしてみると、今回の測定結果からは、身体組成の面からは、男児が女児よりも除脂肪体重とその比率が高く、脂肪比率が小さいことがうかがわれた。また、25メートル走においては男女児ともに再現性が認められなかったが、立ち幅跳びにおいてはかなり高い再現性が見られた。その背景には、持続時間6～7秒の25メートル走では、ホスハーゲン系という非乳酸性の無酸素性エネルギー過程の上に、左右非同期性・交叉性の神経支配によるために、日頃、この動作を反復練習しない限り、幼児の場合は必然的に再現性は低下する。一方、瞬時に経過する立ち幅跳びでは、ホスハーゲ

ン系のうちの瞬時のATP分解のもとに行なわれるばかりでなく、左右同期性・同側性の神経支配によるために再現性が高くなっているものと思われる。

4～7分という持続時間の860メートルという持久走においては、一般的傾向とはことなり、男児が女児よりも遅いという結果が得られたが、それは他の研究報告^{1,2,13,15)}における測定値よりもかなり遅いためである。その背景には有酸素性能力・走行効率・動機等が低いという要因が存在するためであると思われる。

25メートル走と860メートル持久走の間には、女児では有意の相関が見られたが、男児では全く認められなかった。それは、男児において25メートル走において成績の良かった者の低下によるものであった。今後、特に神経筋調整作用の発達・改善という立場から、25メートル走の反復練習が望まれる。持久走においても、トレーニング能が存在するので、週2回、走行速度120～140メートル、持続時間2～3分の持久走を実施すれば有酸素性能力の改善は可能である。このことは、呼吸循環機能等の本来の発達を促がすと同時に、思春期において発達を開始する無酸素性能力により、運動時にこれまでとは違って多量に産生される乳酸の処理能力を高めておく必要があるということの意味している。

文 献

- 1) Buskirk, E. and Taylor, H.L. (1957): Maximal oxygen uptake and its relation to body composition with special reference to physical activity and obesity, *J. Appl. Physiol.* 11: 72-78.
- 2) Conley, D.L and Krehenbuhl, G. (1980): Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 9: 357-360.
- 3) Daniel, J. (1985): A physiologist's view of running economy (1985): *Med. Sci. Sports Exerc.*, 14: 332-338.
- 4) Eriksson, B.O., Gollnick, P.D., and B. Saltin. (1973): Muscle metabolism and enzyme activities after training in boys 11-13 years old. *Acta. Physiol. Scand.*, 87: 485-497.
- 5) Fick, A. (1870): Ueber die Messung des Blutquantums in den Herzventrikeln. *Sitzungsber. der Phys.-med. Gesellsch. zu Würzburg*, S. X VI.
- 6) Toshihiko TOKIZANE and Hiroshi SHIMAZU (1964): Functional Differentiation of Human Skeletal Muscle-Corticalization and Spinalization-. University of Tokyo Press.
- 7) Lehmann, M., Keul, J. und U. Korstenpeck (1981): Einfluß einer stufenweisen Laufbandergometrie bei Kindern und Erwachsenen auf die plasmacatecholamine, die aerobe und anaerobe Kapazität *Eur. J. Appl. Physiol.*, 47: 301-311.
- 8) 金崎美美子、吉澤茂弘 (1994): 24時間心拍数記録による保育所幼児の身体活動に関する研究、

小児保健研究、53:402-411.

- 9) 厚生省統計協会 (2001): 国民衛生の動向48(9):466-467.
- 10) Shigehiro YOSHIZAWA, Hiroko HONDA, Naka Nakamura, Kiyohide ITOH, and Nobuo WATANABE (1997): Effects of 18-Month Endurance Run Training on Maximal Aerobic Power in 4- to 6-Year-Old Girls, 9:33-43.
- 11) 栃木県幼稚園教育研究所 (1985): 幼児の運動機能の発達、社団法人栃木県幼稚園連合会
- 12) 吉澤茂弘、石崎忠利、本多宏子 (1984): 日本の農村における幼児及び青少年 (4-18歳) の有酸素性作業能力の発達に関する研究、体育学研究、28(3):199-214.
- 13) 吉澤茂弘、石崎忠利、本多宏子、亀岡隆之、森田良司、石川栄寿 (1976): 幼児の有酸素的作業能に関する研究、体力科学、26:254-262.
- 14) 吉澤茂弘、本多宏子、漆原 誠、中村 伸 (1988): 保育園における幼児の身体活動に関する研究、体力科学、37:158-171.
- 15) 吉澤茂弘 (1994): 総説幼児の有酸素性能力とその特性 (Review, Characteristics of Aerobic Work Capacity in Young Children)、日本運動生理学雑誌、1(2):1-26.